

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 2 日現在

機関番号：11601

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560314

研究課題名(和文)ブリッジ結合磁路を利用した可変出力・磁気発振型正弦波出力インバータの開発

研究課題名(英文)Development of a magnetic oscillation type variable-output inverter using bridge-connected magnetic circuit

研究代表者

岡沼 信一 (OKANUMA, SHINICHI)

福島大学・共生システム理工学類・教授

研究者番号：40141866

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円、(間接経費) 1,230,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、磁気発振型正弦波出力のインバータとブリッジ結合磁路を組み合わせて、交流系統への出力電力制御が可能な可変出力インバータを開発することを目的とした。数値目標を、制御可能な出力電力が4 kW以上で電力変換効率を92 %以上に設定した。まず、汎用電子回路シミュレーターSPICEで利用可能なブリッジ結合磁路の磁心モデルを考案し、次いで、3次元磁場解析ソフトJMAGを用いてブリッジ結合磁路の磁心内部・外部の磁界分布を解析した。しかし、ブリッジ結合磁路を利用して構成した可変出力の磁気発振インバータでは、出力電力が1.6 kWで電力変換効率83 %と目標値には達しなかった。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to develop a variable-output magnetic oscillation inverter using a bridge-connected magnetic circuit. The target of output electric power of the inverter was set as 4 kW or more, and that of efficiency was set as 92 % or more. First, the magnetic core model of the bridge-connected magnetic circuit which can be used by a general-purpose electronic circuit simulator SPICE was devised, and then magnetic field distribution of inside, and outside, of the bridge-connected magnetic circuit was analyzed using three-dimensional magnetic field analysis software JMAG. Finally, maximum output electric power of 1.6 kW and power-conversion efficiency of 83 % were obtained in a trial magnetic oscillation inverter using bridge-connected magnetic circuit. These values, however, did not reach desired values.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学、電力工学・電力変換・電気機器

キーワード：磁気発振回路 ブリッジ結合磁路 インバータ 系統連系装置

1. 研究開始当初の背景

近年、自然エネルギーを活用した発電設備、たとえば太陽光発電や風力発電設備などの普及に伴い、発生した直流電力を既存の交流系統に供給する系統連係装置への要求関心が高まっている。この系統連係装置としては、一般に電圧型フルブリッジインバータを主回路とする PWM 電流制御方式によるインバータが使用されている。しかし、この方式のインバータでは、任意電圧波形の発生や独立電源化など多機能化が容易に可能ではあるが、インバータ側と交流電力系統側の電圧、周波数ならびに位相角を同期させるための高精度の検出・制御ならびに駆動回路が必要であり、システム構成が複雑となるため、価格も比較的高価になる状況にある。

2. 研究の目的

本研究の目的は、構成が簡単で信頼性の高い系統連係装置としての実用化を目指し、ブリッジ結合磁路を用いて、直流信号電流により出力電力の制御が可能で、正弦波出力の磁気発振型正弦波出力インバータを開発することである。しかし、これまでの研究成果では、出力電力の制御可能範囲が小さく、また直流信号電流に対する出力電力の制御特性が非直線かつ垂下特性を示すなど、実用化には問題が残っている。そこで、この研究期間では、家庭用の比較的小出力の太陽光発電システムあるいはマイクロ水力・風力発電システムでの実用化を想定し、本方式によるインバータの出力電力の制御範囲の拡大化を実現する。数値目標として出力電力の制御可能範囲を 4 kW 以上で電力変換効率を 92 % 以上に設定する。

3. 研究の方法

本研究の目標を達成するためには、磁気発振型正弦波出力インバータ本体の出力電力拡大と、本出力電力制御方式に最適なブリッジ結合磁路の設計にあると考えている。

そこで、初年度にはブリッジ結合磁路を除いた磁気発振型正弦波出力インバータ本体の出力電力拡大に取り組む。これまでの研究成果から明らかになった、出力電力拡大に関する幾つかの事項を実行する。

次いで、次年度にはブリッジ結合磁路の内部の磁場解析を行い、ブリッジ結合磁路の磁束制御特性を解明するとともに、初年度の成果に基づき本方式の正弦波出力インバータの出力電力制御に最適な寸法比及び巻線方式を決定する。最終年度では、初年度及び次年度の成果に基づいて本方式の正弦波出力インバータを製作し、本研究の数値目標を達成する。

4. 研究成果

(1) インバータ本体の出力電力特性

ここでは、ブリッジ結合磁路を除いた磁気発振型正弦波出力インバータ本体を製作して、その性能試験を行った。まず、コバルト

系アモルファステープを特製のトロイダルポピン (27mm 幅) に 60 回巻いた磁心を 2 個製作し、一方を磁気発振用 (36.78g)、他方をブリッジ結合磁路用 (36.81g) とした。この磁気発振用のアモルファストロイダル磁心を用いて、磁気発振型正弦波出力インバータ本体を製作した。

図 1 に、インバータ本体の実験回路構成を示す。図中、はアモルファストロイダル磁心であり、 V_d は直流電圧源の電圧、 V_p は交流系統の電圧である。 N_1 は励磁巻線、 N_2 は出力巻線、 N_c は制御巻線である。 $m_1 \sim m_6$ はスイッチング素子 (MOSFET) $X_1 \sim X_6$ のゲート用巻線である。 $X_1 \sim X_4$ の MOSFET には外部に高速ダイオードを付加して内蔵ダイオードの逆回復特性を見かけ上改善される様に工夫されている。また、スイッチングに起因する放射ノイズを低減させるため、交流電圧源側にコモンモードチョーク T_f を接続した。また、本インバータに加える交流電圧及び制御電流を、可変単巻変圧器 SR_1 及び SR_2 を利用して生成し、手動で調整した。

図 2 に、制御電流 i_c の実効値 $I_c = 0.45$ A の場合における入力側及び出力側電圧電流の観測波形例を示す。これを見ると、交流側の電圧 v_a と電流 i_{as} の位相差はほぼ 180 度であり、インバータ側から交流系統側に電力が供給されていることが判る。

図 3 に、入出力電流の制御特性例を示す。 I_{as} は i_{as} の実効値で、 I は平均値である。

図 4 に、入出力電力の制御特性を示す。ただし、 P_1 は直流電源からの入力電力、 P_2 が交流系統への出力電力、 P_c が制御回路で消費する電力で、 η は $\{(P_2 - P_c) / P_1\} \times 100$ で定義した電力変換効率である。これを見ると、最大出力電力 3.6 kW で最大電力変換効率 90 % が得られていることが判る。しかし、この結果は、目標値に達しておらず、目標値のほぼ 90% の値である。

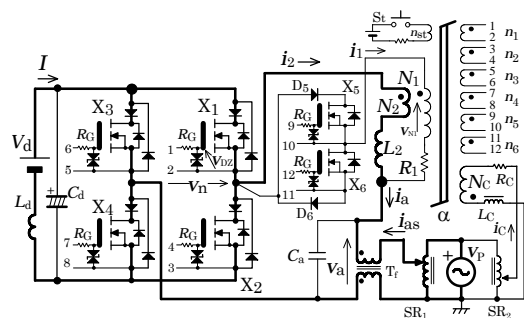
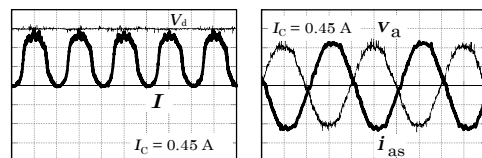


図1 磁気発振インバータ本体の実験回路構成



(a) 入力側電圧電流 (b) 出力側電圧電流
 $V_d: 150V/div, I: 5A/div, v_a: 100V/div, i_{as}: 10A/div.$

図2 入出力電圧電流観測波形

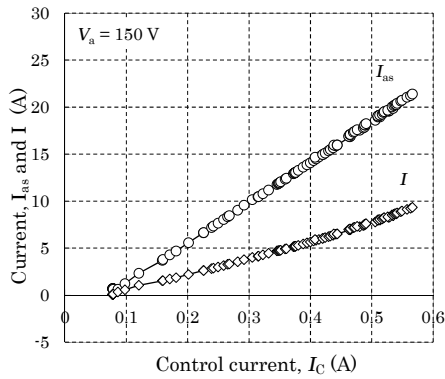


図3 入出力電流制御特性

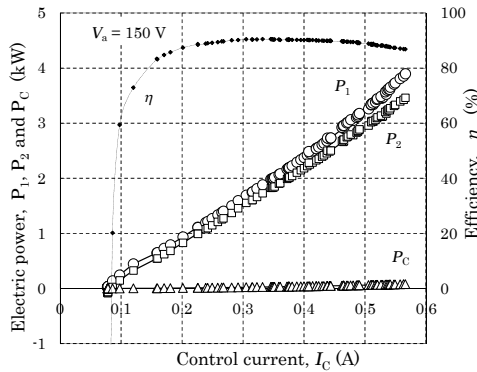


図4 入出力電力制御特性

(2) ブリッジ結合磁路の SPICE モデル

ここではブリッジ結合磁路の汎用電子回路シミュレータ“SPICE”モデルを考案し、ブリッジ結合磁路を利用した磁気発振型インバータの動作特性、その他のデバイス及び発振周波数、損失など総合的に検討を行った。図5(a)に、ブリッジ結合磁路の磁心構成を示す。A はアモルファストロイダル磁心、B は U 形磁心である。同図(b)は巻線構成である。磁路#1 及び#2 に並列に巻かれた N_{B1} は励磁巻線であり、励磁電流 i_B が流れる。 N_{BC} は制御巻線で、直流電流 I_{BC} を流す。同図(c)は記号化した回路である。ブリッジ結合磁路では、 I_{BC} の値によりトロイダル磁心の角形飽和特性を保持したまま、その見掛けの飽和磁束値(最大磁束値)を減少させることが可能である。

図6は考案したブリッジ結合磁路の SPICE モデルを示したものである。図中、(a)はモデル化の対象となるブリッジ結合磁路であり、(b)はその電気回路で(d)が磁気回路、(c)が電気回路と磁気回路を結合するファラデーの法則に対応する等価回路である。磁気回路中の BM_1 及び BM_2 は、トロイダル磁心の磁気飽和を表す電圧制御電圧源である。このモデルを用いて、 I_{BC} の値に対するトロイダル磁心の起磁力 $N_{B1}i_B$ と磁束 ϕ_B (図6において ϕ_1 と ϕ_2 の平均値)の関係、即ち磁束制御特性、について計算結果と実験結果を比較したものを図7に示す。これを見ると、両者の間にはその傾向において良好な一致が見られており、 I_{BC} の値によりトロイダル磁心の最大磁束値が制御可能であることがわかる。

この結果から、提案したブリッジ結合磁路の SPICE モデルが本インバータの動作特性解析

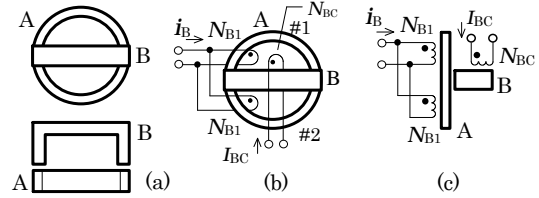


図5 ブリッジ結合磁路の基本構成

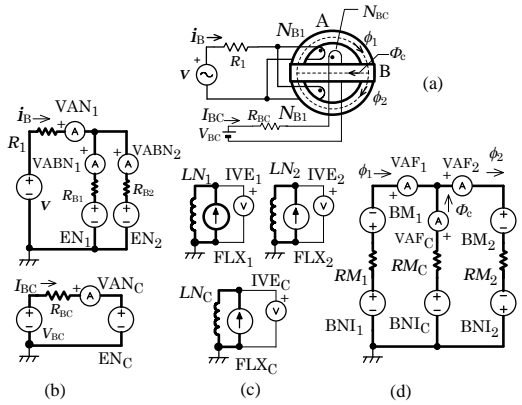


図6 ブリッジ結合磁路の SPICE モデル

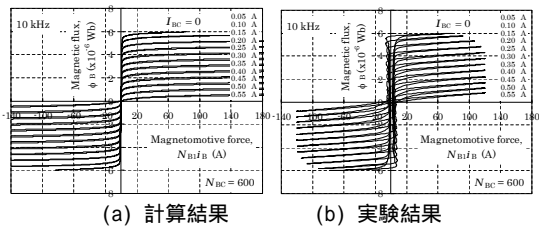


図7 ブリッジ結合磁路の磁束制御特性計算例

ならびに設計に有効であることを明らかにした。

(3) 3次元磁場解析ソフトによるブリッジ結合磁路の磁界分布解析

ここでは、本インバータシステムに最適なブリッジ結合磁路の磁心材質及び形状を明らかにするため、市販の3次元磁場解析ソフトを用いて磁心内部及び外部の磁界分布を定量的に解析した。使用した磁場解析ソフトは JSOL 社が開発した電気機器の設計・開発のためのシミュレーションソフトウェアである JMAG を使用した。

図8に、解析ソフトに付属する形状エディターにより作成したブリッジ結合磁路を示す。ただし、磁心は灰色、トロイダル磁心巻線が緑色、U形磁心巻線が黄色で示されている。この解析ソフトには、まだコバルト系アモルファスのモデルが存在していないため、磁心として軟磁性材料で異方性の指定が等方性である JFE スチールを使用した。

図9に、磁心及び巻線に解析用のメッシュを生成した例を示す。同図(a)は 10 mm 間隔のメッシュ、(b)は 2 mm メッシュである。

解析は両メッシュにおいて行ったが、ここでは10 mmメッシュで得られた結果のみを示す。図10に、周波数50 Hzの励磁電圧の各時刻における磁界分布の計算結果を示す。ただし、青が磁束密度の低い領域、黄色から赤が高い領域である。これを見ると、時間とともに各部の磁束密度が変化していること、及び磁心の一部に磁場が偏る領域が存在することなど、幾つかの新しい事項が明らかとなった。

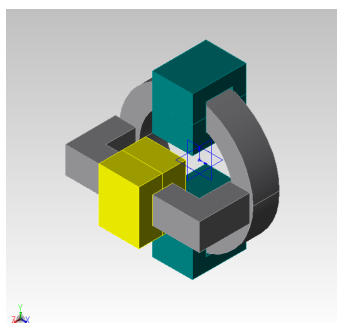


図8 形状エディターで作成した解析用磁心

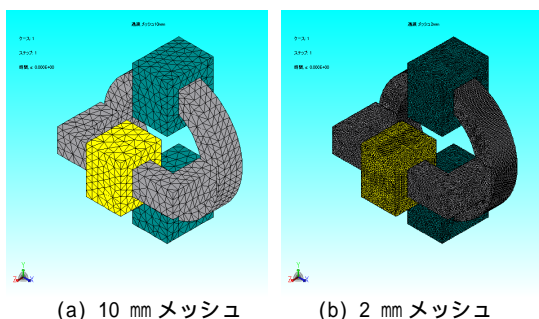


図9 メッシュ生成

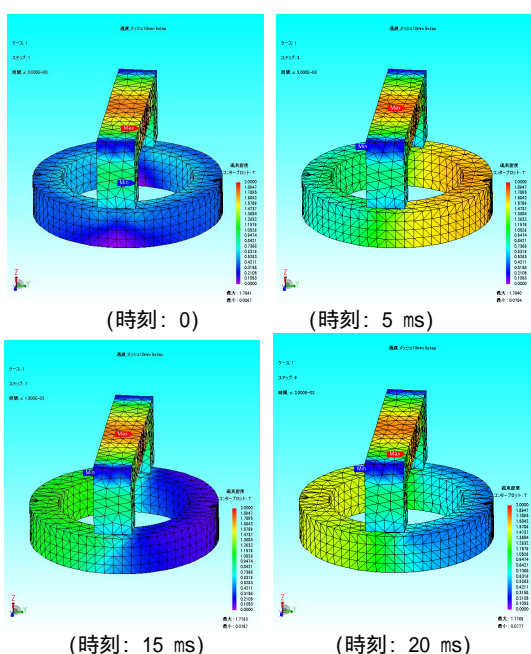


図10 各時刻の3次元磁場解析結果例

この磁場解析により、可変出力磁気発振型インバータ用のブリッジ結合磁路として、最適な磁心構成を明らかにすることが可能であると思われる。

(4)ブリッジ結合磁路を用いた磁気発振型インバータの性能試験結果

ここでは、先の(1)~(3)の成果に基づき、ブリッジ結合磁路を用いた磁気発振型正弦波出力インバータ本体を設計製作し、その性能試験を行った。

まず、トロイダル磁心として、インバータ本体の磁気発振用磁心と同じ、コバルト系アモルファステープを特製のトロイダルポピン(27mm幅)に60回巻いた磁心(36.81g)を作製し、ケイ素鋼板カットコアをU形磁心として利用して、ブリッジ結合磁路を設計製作した。設計には、(3)で行った磁界分布解析の結果を参考としている。このブリッジ結合磁路と、(1)で製作したインバータ本体を組み合わせた可変出力・磁気発振インバータの特性試験回路を、図11に示す。図中、ブリッジ結合磁路 β 、 X_7 、 X_8 及び平滑回路 L_B 、 C_B 構成された部分が制御回路である。この回路で生成された、 v_a と同位相の交流電流 i_c が、インバータ本体の制御巻線に供給される。 i_c の振幅値は N_{BC} に流す直流電流 I_{BC} により制御される。

図12に、入力側及び出力側の電圧電流観測波形を示す。これを見ると、インバータ本体の場合の電圧電流波形に比べて、磁気発振に起因するノイズがやや大きい。ブリッジ結合磁路の制御巻線 N_{BC} に流す直流電流 I_{BC} により出力電流 i_{as} の振幅制御可能であることが判る。

図13に、入出力電流の制御特性例を示す。 I_{as} は i_{as} の実効値で、 I は平均値である。入出力制御特性は、ブリッジ結合磁路の磁束制御特性により、図示のように垂下特性となる。当初、この垂下特性を改善するため、ブリッジ結合磁路のトロイダル磁心による誘導電圧にインバータ本体磁心による誘導電圧を加えてMOSFETのゲートとする試みを工夫したが、両誘導電圧パルスの僅かな差がスイッチングノイズを拡大させる方向、及びスイッチング素子のアーム短絡の危険が増したため、垂下特性の改善を断念した。

図14に、入出力電力の制御特性を示す。 P_1 は直流電源からの入力電力、 P_2 が交流系統への出力電力、 P_c が制御回路で消費する電力で、 $\eta = \{(P_2 - P_c) / P_1\} \times 100$ で定義した電力変換効率である。性能試験は、 I_{BC} の値を1.4 A程度として磁気発振を開始させ、その後、 I_{BC} の値を減少させたときの各電力を測定した。これを見ると、最大出力電力が1.6 kWで最大電力変換効率83%であることが判る。この結果は、当初の目標値である最大出力4 kW、電力変換効率92%には達していないが、ブリッジ結合磁路を利用する交流系統電力制御の可能性を明らかにした。

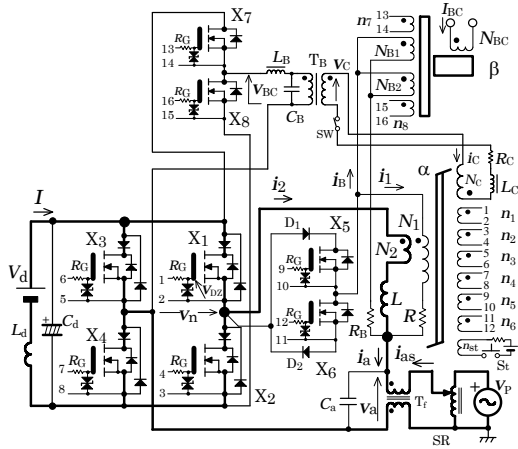
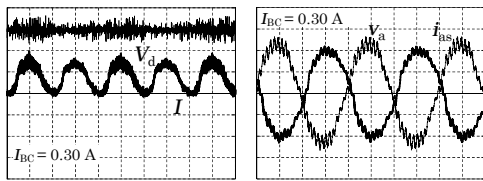


図11 ブリッジ結合磁路を用いた可変出力・磁気発振インバータの特性試験回路構成



(a) 入力側電圧電流 (b) 出力側電圧電流
 $V_d: 150\text{V/div.}, I: 5\text{A/div.}, v_a: 100\text{V/div.}, i_{as}: 6\text{A/div.}$

図12 入出力電圧電流観測波形

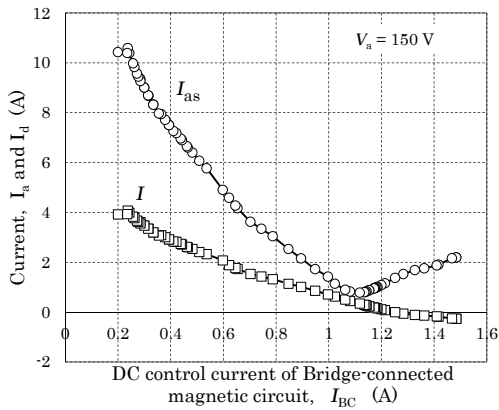


図13 入出力電流制御特性

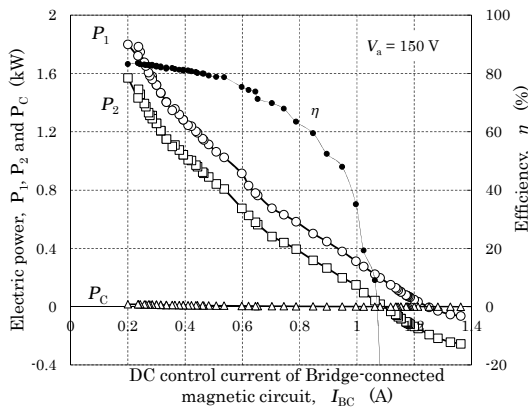


図14 入出力電力制御特性

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 4 件)

S. Okanuma, Improving the Characteristics of Magnetic Oscillation DC-AC Power Converter, Journal of the Magnetics Society of Japan, Vol. 37, No.3-1, pp.85-88, 2013, 査読有.

S. Okanuma, Numerical Analysis of Magnetic Oscillation DC-AC Power Converter Using Bridge-connected Magnetic Circuit, Journal of the Magnetics Society of Japan, Vol. 37, No.3-1, pp.81-84, 2013, 査読有.

S. Okanuma, and P. Khatiwada, Numerical Analysis of Fundamental Characteristics of Magnetic Oscillation DC-AC Power Converter, Journal of the Magnetics Society of Japan, Vol. 35, No. 2, pp.102-105, 2011, 査読有.

S. Okanuma, and P. Khatiwada, Improved Characteristics to Control Output Electric Power of Magnetic Oscillation DC-AC Power Converter, Journal of the Magnetics Society of Japan, Vol. 35, No. 2, pp.92-95, 2011, 査読有.

[学会発表](計 5 件)

岡沼信二、漏れインダクタンスを有するコモンモードチョークを利用した磁気発振 DC - AC コンバータ、第 37 回日本磁気学会学術講演会、2013 年 9 月 3 日、北海道大学

S. Okanuma, Consideration on Characteristics Improvement of Magnetic Oscillation-type DC-AC Power Converter, The International Conference of Asia Union of Magnetic Societies (ICAUMS), 2012 年 10 月 4 日、奈良市

S. Okanuma, Numerical Circuit Analysis of Magnetic Oscillation-type DC-AC Converter Using Bridge-connected Magnetic Circuit, The International Conference of Asia Union of Magnetic Societies (ICAUMS), 2012 年 10 月 4 日、奈良市

カティワダブスカー、岡沼信二、ブリッジ結合磁路を用いた磁気発振型 DC-AC 電力変換器の SPICE シミュレーション、日本産業技術教育学会第 29 回東北支部大会講演論文集、2011 年 12 月 4 日、岩手大学

S. Okanuma and P. Khatiwada, Improved Characteristics on Control Output Electric Power of Magnetic Oscillation-type DC-AC Converter, IEEE INTERMAG 2011 Conference, 2011年4月26日, Taipei Taiwan.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕
出願状況(計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況(計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

岡沼 信一 (OKANUMA, Shinichi)
福島大学・共生システム理工学類・教授
研究者番号：40141866

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：